

# 仿生粘合有机框架膜 有望实现高效低成本海水淡化

◎本报记者 陈曦

我们生活在一颗蓝色的星球上，海水约占地球表面积 的 71%，而陆地淡水资源只占地球上水体总量的 2.53%。因此海水淡化是解决地球淡水资源缺乏的有效途径之一。

## 渗透蒸发成海水淡化新兴技术

现有的海水淡化技术根据技术原理大致可分为热法(或称蒸馏法、蒸发法)和膜法两大类。“热法脱盐的核心在于利用热能驱动盐水相变(从液态水变为水蒸气),通过相变过程实现挥发性物质水和非挥发性物质盐的分离。”天津大学化工学院教授姜忠义介绍,多级闪蒸和多效精馏是发展时间最长,应用最为广泛的两类热法脱盐技术,这两种技术的装机容量占全球海水淡化总装机容量的 25%。

热法脱盐虽然脱盐率高达 99.9%,处理量大,但需要把液态水变为水蒸气,因此能耗较高,产水总体成本大约为 6.5—17.7 元/吨。因此热法脱盐在热量充足的中东地区等应用更为广泛。膜法脱盐包括反渗透、正渗透、纳滤等,因为无相变过程,所以通常无需提供水的汽化潜热。“相比于热法脱盐,膜法脱盐在能耗上表现出显著优势。反渗透技术是最为成熟的膜法脱盐技术。”天津大学化工学院研究员潘福生解释,这种技术利用半透膜实现盐离子和水分子分离,通过精密构膜孔径尺寸及电荷性质,使得膜只允许水分子通过而截留盐离子。当在盐水侧施加一个大于盐水渗透压的压力,即可驱动水分子由盐水侧向淡水侧扩散,而盐离子无法通过,即可实现盐水分离。

由于反渗透技术不需要相变,不需要消耗潜热,如果水回收率达到 50% 的时候,其热力学极限能耗为 1.06 千瓦时/每立方米(kWh/m<sup>3</sup>),远低于

日前,天津大学化工学院姜忠义、潘福生课题组和南开大学张振杰课题组研制出一种名为“共价有机框架”(COF)的新型膜材料,应用于渗透蒸发脱盐技术,可快速淡化海水,而且该方法整体综合能耗比目前已有的海水淡化技术更低。相关研究发表在国际期刊《自然·可持续发展》上。

于热法脱盐的 13kWh/m<sup>3</sup>,其产水成本为 4.7—7.4 元/立方米。

目前膜法反渗透技术已成为全球装机容量最大(约占 69%)、应用最为广泛的脱盐技术。“也因为如此,膜材料被称为海水淡化技术的‘芯片’。”潘福生介绍,国内相关研究起步较晚,海水淡化反渗透膜使用的高端聚酰胺膜材料主要依赖进口,核心材料、工艺、装备的国产化依旧是膜技术领域急需解决的问题。

近年来兴起了一类新的脱盐技术,即热—膜耦合脱盐技术,如渗透蒸发。该技术既具有热法的相变过程,也具有膜法选择渗透特性,因此在能耗和脱盐性能上均表现出独特优势。

“渗透蒸发脱盐的原理是海水在膜两侧蒸汽压差的推动下,水分子在膜中经过液体流动,发生相变,最终以气态形式透过膜,而后冷凝收集。”潘福生介绍,不同于膜蒸馏,渗透蒸发膜为亲水的致密材料,孔径通常小于 1 纳米,膜本身具有阻隔盐离子的能力,起到主要分离作用,同时盐无法发生相变,从而被进一步截留。同时,大量的纳米膜孔道作为毛细管可提供丰富的蒸发面积,其气—液界面的存在也可以让水轻松通过。

渗透蒸发具有膜法脱盐低能耗的优势,其能耗估算约为 5—7kWh/m<sup>3</sup>,电能消耗低于反渗透技术,因此其产水成本预计为 4.5—12.9 元/立方米,有望成为最为经济的脱盐技术之一。

## 仿生技术解决成膜性差难题

目前,渗透蒸发技术用于脱盐尚处于初步探索阶段,其核心技术就是膜材料的选择和制备。近年来,COF 作为一种高度规整有序的框架结构高分子,有望成为新一代的脱盐膜材料。

“COF 通过可逆共价反应将结构单元定向组装形成框架孔结构,实现了膜内传质通道从无到有有序的转变。”南开大学化学学院研究员张振杰解释,二维 COF 具有原子级厚度,可进行模块化组装,把无序曲折的网络孔道变为有序的框架孔道,就像把弯弯曲曲的羊肠小路变为宽阔笔直的大马路,从而减少水通过的阻力并提升筛分能力,最终获得高通量和高脱盐率。

不过作为一种晶态材料,COF 成膜性较差,制备超薄的 COF 膜是极大的挑战。

“COF 膜内部是晶体的拼接,晶体与晶体之间的边界很脆弱,就像在同一块地方铺地砖一样,地砖块数越多,产生的缝隙就越多,容易有缺陷。”姜忠义介绍,为了填补膜内的边界缺陷,团队借鉴沙堡蠕虫筑巢过程和巢穴结构,提出了解决方案。沙堡蠕虫是一种生活在海

岸边的软体动物,在筑巢时会先收集附近贝壳碎片、沙砾等物质作为筑巢的原材料,而其分泌的胶状黏液可以将碎片粘合在一起,形成完整的居巢。

团队设计制备了具有粘合作用的纳米胶带,用来粘合纳米片边缘,把单片的纳米片拼接起来,从而使单片纳米片的面积增大,形成完整而牢固的结构,膜的整体质量也更高。

“不过在纳米胶带材料选择上我们遇到了难题。并不是每种材料都能制备成纳米胶带,这和材料的形貌、化学组成有关。”张振杰说:“通过对上千种 COF 材料进行筛选并进行理性设计,我们最终从中找到了满足需求的超微孔纳米胶带材料。”

胶带最主要的特性是要有“粘性”,纳米胶带的粘性是通过静电相互作用实现的。“我们在设计的时候把纳米片设计成带负电,纳米胶带带正电。”张振杰介绍,制备带电 COF 材料也是一个挑战。我们刻意设计了含有吡啶官能团的构筑单体,吡啶官能团非常容易与酸结合进行质子化,使 COF 材料带正电。因此通过简

产区,也是梗稻重要的起源中心。

但在相当长的一段时间里,江苏市场上销售的高端优质大米基本都是外来的,有东北大米、泰国香米、日本稻米,唯独没有江苏大米。

1991 年,王才林自费公派到日本崎崎大学农学部进修。到日本的第 1 个月,老师为他点了一份生鱼片便当。第一次吃生鱼片的王才林,却被配的米饭惊艳。“生鱼片我吃不下去,但是米饭格外好吃。”王才林问老师:“这是什么大米? 怎么这么好吃?”

“你这都不知道啊! 这是越光,是日本最好吃的大米。”老师回答时脸上那种骄傲的表情,让王才林至今难忘。王才林又专门来到日本的超市,“秋田小町”“一见钟情”“日之光”,甚至还有“晴天霹雳”……日本超市里的大米不仅品种多样,包装精美,名字取得也都好好听。

受到启发,王才林坚定地认为,随着人民生活水平的提高,在国内,优质大米也一定会备受青睐,品质育种是个必然趋势。

90 年代,王才林又先后两次前往日本攻读博士和从事博士后研究。学业结束后,他婉拒了导师的一再挽留,放弃了在日本的优厚条件,毅然回国。此时,他的心里已经有了一个目标,并决定用一生去追寻:“让人国吃上最好吃的大米。”



# 99.9%

用这种方法制备的 COF 膜用于渗透蒸发脱盐,处理重量百分比为 3.5 的氯化钠水溶液,水通量可达每小时 267 千克/平方米,为市面上传统高分子膜 4—10 倍,脱盐率达 99.9%。同时,COF 膜表现出良好的抗污能力和长期稳定性,盐浓度适用范围广,展现出很强的适用性。

单的酸处理,就可以得到带正电的纳米胶带,而且质子化程度、强度都非常高。纳米片和纳米胶带正负电中和,从而得到中性、稳定的 COF 膜。

用这种方法制备的 COF 膜用于渗透蒸发脱

## 成本降低到每克 1 元以下

将 COF 膜用于渗透蒸发海水淡化具有广阔的应用前景。

“COF 膜材料结构规整有序、稳定性强,属于海水淡化的新一代膜材料。同时新兴热—膜耦合脱盐法是极具潜力的新一代脱盐技术。”姜忠义表示,这种强强联合一方面可为海水淡化领域带来新的血液,推动现有技术的发展,提高性能,降低能耗;另一方面有望打破目前反渗透海水淡化国外技术垄断的地位,破除行业与技术壁垒,进一步提升我国海水淡化自主技术的国际竞争力。

此外,COF 膜潜在的应用领域也非常广阔。由于 COF 膜的强筛分性能和有机材料特

性,还有望在清洁能源生产、二氧化碳减排等领域得到应用。

“团队致力于探索宏量、绿色制备 COF 的工艺,现在也取得了一些进展。”张振杰介绍,无需加入有毒的低沸点有机溶剂,只采用熔融聚合工艺就可以制备 COF。使用这种工艺无需处理危废,降低了成本,同时产率高,目前已经实现了千克级的绿色合成,成本降低到每克 1 元以下,接近工业化生产成本要求。

不过,目前 COF 膜的规模化制备、海水淡化集成工艺还需要进一步探索。团队期待未来可以真正实现 COF 膜的工业化生产,推动海水淡化技术上一个新的台阶。

## 成果播报

## 高压直流输电领域 再添两项我国主导的 IEC 标准

科技日报讯(记者马爱平 通讯员鞠勇 谭波)近日,记者获悉,中国电科院主导修订的两项国际电工委员会(IEC)标准《IEC62344:2022 高压直流接地极通用设计导则》和《IEC62681:2022 高压直流架空输电线路电磁环境特性》正式发布,标志着我国在高压直流输电领域的国际标准化工作取得了新的突破。

上述两项标准由 IEC“100kV 以上高压直流输电”技术委员会(TC115)归口管理,IEC TC115 是首个由中国自主提出并承担秘书处的 IEC 技术委员会,中国电科院负责秘书处具体工作。2008 年成立至今,IEC TC115 已经发布 10 项 IEC 标准,其中 7 项为中国牵头制定修订。

直流接地极标准和电磁环境标准 1 版分别于 2013 年和 2014 年正式发布,是中国电科院依托 IEC TC115 主导制定的首批高压直流输电领域国际标准。近些年,随着高压/特高压直流输电技术的快速发展和大规模工程应用,中国等国家在高压直流接地极和高压直流输电线路电磁环境预测与控制等方面实现了诸多进展,亟须对上一版标准补充完善。据此,中国电科院于 2016 年发起成立了两项标准的维护工作组并担任召集人。

新版标准完善了短时段单极大地运行系统的接地电阻限值等要求,增加了接地极设计流程和近年来中国特高压工程中广泛应用的接地极在线监测技术等内容,增加了高压直流输电线路地面合成电场、可听噪声和无线电干扰海拔修正方法,为世界各国高压直流接地极设计和直流架空输电线路电磁环境预测和控制提供了重要参考。

两项新版标准的发布填补了高海拔直流电磁环境研究领域的空白,显著提高了标准的实用性和先进性,进一步提升了我国在高压直流输电领域的影响力,对中国高压/特高压直流输电技术在世界范围内的推广应用具有重要意义。

## 外观追溯系统精准识别 让防伪标签“绑定”商品实物

科技日报讯(记者金凤 通讯员周伟)产品外包装上的防伪码能确保指向的就是包装内的商品吗,如果商品和防伪码是“两张皮”怎么办? 最近,南京工业大学张帆教授团队,提出一款名为“面向生物外观特征的鉴真溯源系统”的技术解决方案,且部分模块化产品已经投入具体应用并取得良好效益,该成果日前在计算机领域顶级的“国际声学、语音与信号处理会议”上发表。

“现在市场上常见的防伪技术有内外码防伪技术、激光镭射防伪技术等,都是在标签或外包装上面做文章,它们始终无法解决的一个问题是:标签是不是对应着里面的实物。”张帆表示,为了解决这个问题,他们基于生物特征的图像鉴真溯源技术集成与应用,利用图像处理、人工智能等新一代信息技术,通过机器学习训练出卷积神经网络鉴真防伪模型,对商品的纹理进行模拟计算,将计算结果保存在云端数据中心,并通过外包装识别算法,从而验证包装内的商品是否是生产加工出厂的那一件商品。

张帆举了个例子:“比如要验证青藏特产牦牛肉的真伪,消费者购买时只需扫一下包装盒上的二维码,并按照指引拍摄商品的实物,系统便会通过云端数据中心鉴真防伪模型的计算,实时给消费者反馈当前商品是否与外包装是配套的商品,同时反向追溯联盟区块链上商品的生产加工销售信息。”

据悉,该成果通过卷积神经网络鉴真防伪模型,实现农产品鉴真防伪,目前已应用于雨花茶、黔茶、五常大米、青海牦牛肉、藏系羊肉、枸杞、藜麦、酸奶、果蔬等 120 多种农产品,识别率达到 90% 上。



农产品博览会上带有防伪标签的南瓜产品 视觉中国供图

## 杭州地铁 3 号线开通 边角坐标法节约建设成本

科技日报讯(记者矫阳)近日,横穿杭州东西城区的地铁 3 号线一期工程全线开通,极大缓解了杭州城西的拥堵。其中,最大车站西溪湿地南站成为日客流量最多的车站。

杭州地铁 3 号线一期工程全长 52 公里,全线有 35 座地下车站,设计时速 80 公里,其中,位于西溪国家湿地公园南门的西溪湿地南站是全线最大车站,为地下三层双岛四线车站,总长 504.2 米,总建筑面积 7.6 万平方米,相当于 7 座标准站。该车站也是杭州市轨道交通线网中东西走向骨干线重要转接点,为全线重难点工程,建设首创“边角坐标法”,取代过去的“中心法”,节约了大量建设成本。

西溪湿地南站抗浮及内支撑采用抗拔桩和格构柱桩等,而格构柱桩施工精度要求高,其中,钢支撑、混凝土支撑的架设要求必须位于同一轴线。在毫无经验可借鉴的情况下,中铁二十二局项目技术人员探索创新的“边角坐标法”,实现了快速定位格构柱位置及方向的目的,相比传统的“中心法”,每根桩定位节约 30 分钟工作量,且最大方位偏差仅 10 毫米,完全符合设计要求。

在车站建设中,项目部还创新刷壁工艺,采用“一种十字钢板接头地下连续墙可拆卸刷壁装置”,通过在刷壁器底部设置刀脚,刷壁钢板采用网格空状等节方法,增加刷壁效率,在保证质量的前提下,较普通刷壁器节约 2 小时。

# 南粳系列为何能撑起江苏稻米产业半边天

◎本报记者 张晔

江苏海安市俞万家庭农场,农场主于清荣正带着人忙着插秧,他的身后是 1600 亩稻田。

“这个南粳 9108 是最适合我们海安种植的水稻品种。”于清荣抓起一把秧苗给记者看,“它的亩产至少 1200 斤,吃起来口感很好,去年稻谷价格就卖到 1.58 元/斤,在上海、苏州市场供不应求。”

近日,在南京举行的全省科技奖励大会上,江苏省农科院研究员王才林主持的《高产优质食味梗稻南粳 46、南粳 5055 和南粳 9108 的创制与应用》项目,获江苏省科学技术奖二等奖。

从 20 世纪 90 年代起,王才林就潜心培育既好吃又高产的水稻,先后育成多个优良食味水稻品种。目前,江苏水稻种植面积约为 3300 万亩,其中用王才林团队研发培育的南粳系列品种就占了 40%,成为振兴苏米产业的顶梁柱。

## 收集数千品种,找到让大米好吃的关键基因

江苏自古以来就是鱼米之乡,其中太湖流域拥有超过 8000 年的稻作史,是我国著名的稻米

为了培育既高产又好吃的大米,王才林团队收集了数千个梗稻品种,其中就包括东 194,从中发现了控制水稻食味品质的关键基因 Wx-mp,历经十多年耕耘,培育出适合太湖流域种植的南粳 46,品质可与日本的“越光”水稻媲美。随后,又持续研发出南粳 5055、南粳 9108 等系列优良食味软米品种。其中,南粳 9108 为全国推广面积最大的梗稻品种之一。

## “三品一标”助力苏米产业振兴

一家煮饭百家香,一亩稻花香十里。南粳系列水稻推广后,很快在国内稻米市场一炮打响。

“以南粳 46 为例,它达国标二级优质稻谷标准,煮出的米饭晶莹剔透,有香味,口感柔软滑润,富有弹性,冷而不硬,食味品质极佳,被誉为江苏省‘最好吃的大米’。”王才林向记者介绍说。

同时,南粳系列水稻还具有抗条纹叶枯病和产量高的特性,平均亩产高达 600—700 公斤,7 个品种被农业农村部认定为超级稻,实现了优质与抗病、高产的统一。

于清荣告诉记者,2016 年他刚开始种植南粳 9108 时,也是将信将疑,抱着试试看的心态种了 200 多亩,没想到稻谷成熟上市,每斤收购价

比其他品种高出 0.2 元,第二年他就淘汰了其他品种,全部改种南粳 9108。

针对江苏“稻强米弱”的现实困境,年逾六旬的王才林继续奔走在田野里。

江苏大米该如何叫响自己的品牌? 王才林告诉记者:“我们大米的加工企业很少有自己的生产基地,另一方面,我们的农户种出了好大米,也不知道销售到什么地方去。为此,南粳稻米产销联盟应运而生。我们为种植大户和加工企业架起桥梁,实现全产业链标准化‘订单种植’。”

2020 年底,江苏省水韵苏米产业研究院有限公司成立,为种植大户提供“三品一标”的技术服务:提供好品种,通过全产业链标准化种植技术,种出好品质,打造好品牌。

目前,南粳系列水稻已成为江苏省优良食味米品种的杰出代表和优质米品牌创建的主导品种,为“苏米”品牌振兴贡献了巨大力量。水韵苏米、金陵味稻、江南味稻、射阳大米、兴化大米等省、市、县域公用品牌,绝大多数用的都是南粳系列品种。其中,南粳 9108 被农业农村部列为长江中下游主导品种。团队又育成南粳 5718、南粳 3908、南粳 9308 等新品种,种植区域覆盖江苏苏南、苏中、苏北和沪、皖、浙、鲁、豫等邻近省份,累计推广面积超过 9000 万亩,增产稻谷 280 多万吨,增收 250 多亿元。